

А. П. ЧЕРНЫЙ, В. К. ТЫТЮК, Ю. В. ЗАЧЕПА, С. А. СЕРГИЕНКО, Е. В. БУРДИЛЬНАЯ

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ДВИГАТЕЛЯ ДЛИННЫМ СИЛОВЫМ КАБЕЛЕМ

В работе приведены экспериментальные исследования методом математического моделирования работы электропривода преобразователь частоты – асинхронный двигатель с учётом реальной формы выходного напряжения инвертора и при подключении двигателя к преобразователю длинным силовым кабелем. Моделирование кабеля выполнено в виде линии с распределёнными параметрами. Показана возможность возникновения стоячих волн перенапряжения. Сделаны выводы о необходимости исследования влияния типа преобразователя, алгоритма модуляции и дополнительного дросселя на процессы преобразования энергии.

Ключевые слова: электропривод, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, моделирование, кабельная линия с распределёнными параметрами, волны перенапряжения

О. П. ЧОРНИЙ, В. К. ТИТЮК, Ю. В. ЗАЧЕПА, С. А. СЕРГІЄНКО, Є. В. БУРДІЛЬНА

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ ДВИГУНА ДО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДОВГИМ СИЛОВИМ КАБЕЛЕМ

В роботі наведені експериментальні дослідження методом математичного моделювання роботи електроприводу перетворювач частоти – асинхронний двигун з урахуванням реальної форми вихідної напруги інвертора і при підключенні двигуна до перетворювача довгим силовим кабелем. Моделювання кабелю виконано у вигляді лінії з розподіленими параметрами. Показана можливість виникнення стоячих хвиль перенапруги. Зроблено висновки про необхідність дослідження впливу типу перетворювача, алгоритму модуляції і додаткового дроселя на процеси перетворення енергії.

Ключові слова: електропривод, перетворювач частоти, асинхронний двигун, моделювання, кабельна лінія з розподіленими параметрами, хвилі перенапруги

O. CHORNYI, V. TUTIUK, IU. ZACHEPA, S. SERHIENKO, E. BURDILNAYA

FEATURES OF OPERATION OF THE FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE WHEN CONNECTING THE MOTOR TO A LONG POWER CABLE

Studies of a frequency-controlled electric drive with asynchronous motors when connected to a converter with a long power cable were performed. Proposed to consider an extended power cord as a line with distributed parameters. The purpose of research is to analyze the arising overvoltages on the stator of an asynchronous motor caused by the wave nature of the electromagnetic processes in the supply cable. In work the developed methods of modeling and research of processes of transformation of energy and operation of frequency-controlled electric power at AC motor by the inverter long cable as a complex combination of models inverter PWM output voltage, of cable line and AC motor. Studies carried out by methods of mathematical modeling using Matlab software environment. For analysis of electromagnetic processes, it is proposed to solve the equations of a long cable line, as lines with distributed parameters, on the basis of a variety of the finite element method and the representation of the cable line, as divided by the spatial coordinate, into a finite number of intervals of equal length, which corresponds to the series connection of two-port networks. The number of quadrupoles is chosen from the condition of reducing the influence of the Gibbs effect. It was determined that the magnitude and nature of the overvoltage is influenced by the cable length, the inductor inductance, the type of inverter, the modulation frequency, and the type of scalar control law. The results obtained can be used as additional recommendations for the operation of a frequency-controlled electric drive, when designing electric drive systems, selecting the structure and parameters of the output filter.

Keywords: electric drive, frequency converter, asynchronous motor; modeling, distributed cable line, surge waves

Введение. Системы электропривода переменного тока с асинхронными двигателями (АД) на базе преобразователей частоты (ПЧ) прочно вошли в практику эксплуатации на предприятиях металлургической, горнорудной промышленности, транспорта. Свойства самого электропривода со скалярным или векторным управлением исследованы также достаточно полно. Однако во многих случаях при расчете и проектировании таких систем не полностью учитываются параметры и характер питающей сети. А между тем внутрицеховые сети с уверенностью можно отнести к разряду сетей ограниченной мощности. Следует также учитывать, что во многих случаях установка преобразователя непосредственно возле АД невозможна и соединение производится при помощи кабельной линии (рис. 1).

Длина кабеля ограничивается фирмами производителями ПЧ по условию снижения напряжения, а также искажения напряжения по причине возникновения

волновых процессов [1–4]. Как показывают результаты исследования, при питании АД от преобразователя с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения и кабельными линиями протяженностью более 50 м, возникает всплески перенапряжения, которые могут быть более чем в 2 раза превышать номинальное напряжение на резонансных частотах, кратных частотам спектра выходного напряжения. На величину и характер волн перенапряжения влияет не только длина кабеля, но и индуктивность подключаемого дросселя, а также тип инвертора, например, двухуровневый, а также частота модуляции.

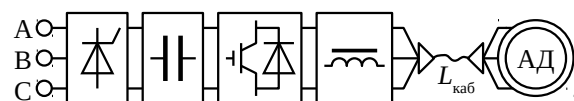


Рис. 1. Функциональная схема электропривода ПЧ-АД

Безусловно, установка дросселя или синус-фильтра улучшает коэффициент нелинейных искажений ТНИ (или THD), приближая форму напряжения к синусоидальной, но необходимо учесть, что выходной дроссель создаёт дополнительную потерю напряжения в приводе, составляющую от 2–3 % при номинальном режиме, и не позволяет полностью решить проблему перенапряжений при значительных длинах кабеля. Кроме того, дополнительная индуктивность на выходе инвертора снижает резонансную частоту длинной кабельной линии, что увеличивает вероятность резонансных явлений на высших гармониках.

Необходимо также учесть, что увеличение выходной индуктивности полностью не решает задачу ещё по той причине, что практически невозможно согласовать волновые сопротивления двигателя и кабеля, так как эквивалентное сопротивление АД является функцией скольжения и примерно в 3 раза в номинальном режиме, в 4 раза в режиме холостого хода превышает эквивалентное сопротивление в режиме пуска. Поэтому если согласованы сопротивления для номинального режима работы, то при пуске или регулировании частоты они будут рассогласованы. Это понимают производители ПЧ, но умалчивают в инструкциях к устройствам, просто выдвигая конкретные требования к длине (табл. 1).

Поэтому моделирование и исследование преобразования энергии и работы частотно-регулируемого электропривода при питании АД от ПЧ длинным кабелем является актуальной задачей.

Целью работы является исследование работы частотно-регулируемого электропривода при питании АД от ПЧ длинным силовым кабелем методами математического моделирования.

Изложение основного материала. Переходные процессы в цепях с распределёнными параметрами имеют волновой характер. Волны могут испытывать многократные отражения от стыков различных линий, от узловых точек включения нагрузки и т.д. В результате наложения этих волн могут возникнуть сверхтоки и перенапряжения, опасные для оборудования. Сравнивая длину линии l с длиной электромагнитной волны $\lambda = V \cdot T$, где $V = 3 \cdot 10^8$ – скорость распространения волны м/с, $T = f^{-1}$ – период колебаний, и с учётом формы выходного напряжения инвертора, в сигнале которого могут присутствовать гармоники выше модуляционных, получаем $l > (0.05 \dots 0.1)\lambda$, а значит, к линии стоит подходить как к цепи с распределёнными параметрами.

Схема замещения линии с распределёнными параметрами может быть составлена на основе дифференциальных уравнений в частных производных:

Таблица 1 – Рекомендуемая длина кабеля для частотных приводов

Преобразователи частоты	Условия работы	Вид кабеля	Длина кабеля, м.
Mitsubishi Electric	При частоте модуляции 1 кГц и ниже	Неэкранированный	30, 100, 200, 300, 500
	При частоте модуляции с 2 до 15 кГц	Неэкранированный	200, 300, 500
ЭЛЕКТРОТЕКС	При использовании дросселя		200
	При использовании синусного фильтра		до 1000
Schneider Electric Altivar	При нормальных условиях	Экранированный	50
	При нормальных условиях	Не экранированный	100
Danfoss	Без использования дополнительного фильтра	Моторный	до 300
Inverter drives	При использовании моторного дросселя	Экранированный	100
		Неэкранированный	100 + 50 %
	При использовании синусного фильтра	Экранированный	+100 % длины
Power XL	При использовании дросселя		до 30
	Без использования дросселя		10
	При использовании синус-фильтра DX-SIN3		20

Устанавливая рекомендации по длине кабеля, производители оговаривают, что дроссели, моторные дроссели и синусные фильтры должны соединяться с выходом ПЧ экранированным кабелем минимально возможной длины. При этом максимальная рекомендованная длина кабеля между преобразователем частоты и выходным фильтром: 2 метра при мощности привода до 7,5 кВт; 5–10 метров при мощности привода от 7,5 до 90 кВт и 10–15 метров при мощности привода выше 90 кВт. Вводятся также дополнительные рекомендации по согласованию частоты модуляции и длины кабеля (табл. 2). Такие ограничения обусловлены тем, что подбор преобразователя и двигателя осуществляется по току и напряжению, поэтому волновое сопротивление кабеля и обмотки двигателя не согласованы, происходит отражение волны напряжения в оба конца кабеля. Это отражение увеличивает пики напряжения на клеммах двигателя.

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}, \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (1)$$

Для решения системы уравнений (1) воспользуемся разностной методикой конечных элементов и представим кабельную линию, как разделённую по пространственной координате, на конечное число интервалов равной длины, что соответствует последовательному соединению четырёхполюсников N (рис. 2), где R_0 , L_0 , C_0 – удельные параметры линии. Модель линии составим в виде (рис. 3) последовательного соединения элементарных четырёхполюсников (рис. 4).

Таблица 2 – Дополнительные рекомендации по согласованию частоты модуляции и длины кабеля

Длина кабеля	≤ 50 м	$50 \div 100$ м	≥ 100 м
Частота ШИМ	$\leq 14,5$ кГц	≤ 8 кГц	≤ 2 кГц

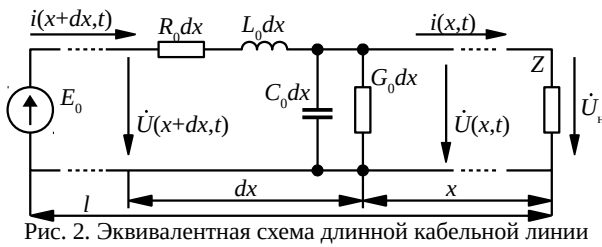


Рис. 2. Эквивалентная схема длинной кабельной линии

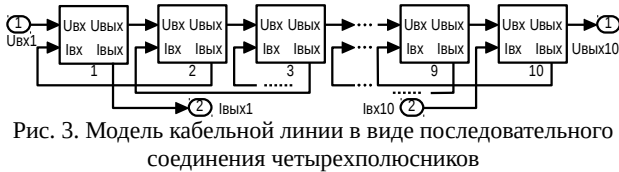


Рис. 3. Модель кабельной линии в виде последовательного соединения четырехполюсников

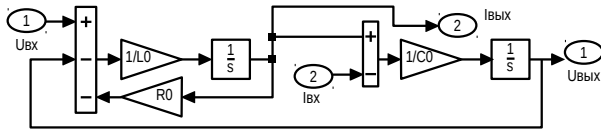


Рис. 4. Схема модели одного четырехполюсника кабельной линии

Для i -го четырехполюсника, без учета потерь в линии, уравнения тока и напряжения для $1 \leq i \leq 2N-2$ будут иметь вид:

$$\frac{dI_i}{dt} = (U_i - U_{i+1} - R_0 I_i) L_0^{-1}; \quad \frac{dU_i}{dt} = (I_{i-1} - I_i) C_0^{-1};$$

$$\frac{dI_{dv}}{dt} = (U_{dv} - R_e(s) I_{dv}) L_e(s)^{-1}; \quad \frac{dU_{dv}}{dt} = (I_{N-1} - I_{dv}) C_0^{-1},$$
(2)

где $R_e(s)$, $L_e(s)$ – эквивалентные активное сопротивление и индуктивность АД, зависящие от скольжения.

Количество четырехполюсников выбирается из условия снижения влияния эффекта Гиббса. Для кабельной линии длиной 200 м, их принято $N = 20$. Увеличение количества четырехполюсников ведёт к значительному увеличению времени вычислений.

В качестве объекта моделирования принят АД 4АН250Г4, мощностью 110 кВт, получающий питание от многоуровневого инвертора. Номинальные параметры: напряжение – 380 В, ток – 195 А, частота вращения – 77,4 рад/с. Форма выходного напряжения показана на рис. 5. Напряжение на статоре АД имеет колебательный вид с явно выраженными высокочастотными пульсациями. Безусловно, колебания и пульсации напряжения на статоре АД зависят не только от длины кабеля, но и от частоты на выходе преобразователя (рис. 6). Характер пульсаций может изменяться не только количественно, но и качественно (рис. 7 ÷ 9). В общем случае, представляют особый интерес исследования влияния частоты модуляции выходного напряжения на форму напряжения на статоре АД, а также вида скалярного закона частотного регулирования. На рис. 10 показаны такие зависимости для АД, принятого для моделирования.

Полученные результаты отображают качественные особенности электромагнитных процессов частотно-регулируемом электроприводе с длинным кабелем. Количественные значения будут зависеть от параметров и характеристик конкретного электромеханического оборудования.

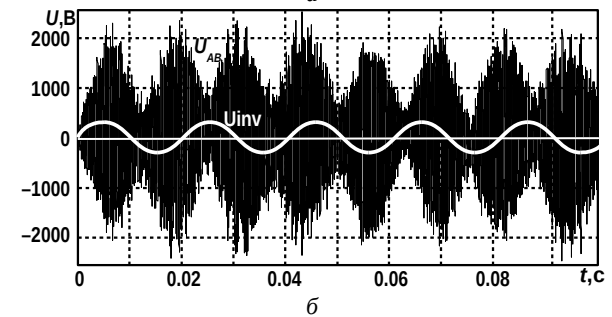
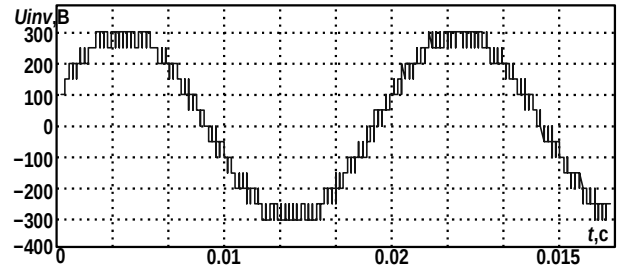


Рис. 5. Форма напряжения: а – на выходе инвертора, б – на выходе инвертора и на статоре АД

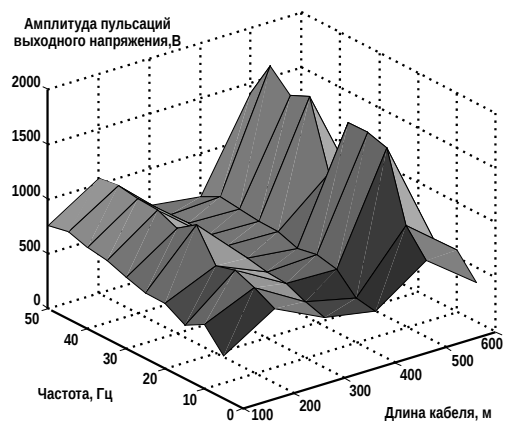


Рис. 6. Колебания напряжения на статоре АД при изменении длины кабеля и выходной частоты преобразователя

Выводы. В работе развиты методы моделирования и исследования процессов преобразования энергии и работы частотно-регулируемого электропривода при питании АД от ПЧ длинным кабелем как комплексного сочетания моделей ПЧ с ШИМ выходного напряжения, кабельной линии и АД. Решение уравнений длинной кабельной линии, как линии с распределенными параметрами, предложено выполнять на основе разновидности метода оконченных элементов с представлением кабельной линии, как распределенную по пространственной координате, на конечное число интервалов равной длины, что соответствует последовательному соединению четырехполюсников. Определено, что на величину и характер перенапряжения влияет длина кабеля, индуктивность дросселя, а также тип инвертора и частота модуляции. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем электропривода или при его эксплуатации, выбор структуры и параметров выходного фильтра.

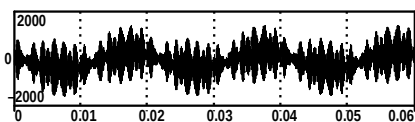


Рис. 7. Напряжение на статоре АД при длине кабеля 500 м, частота на выходе преобразователя 50 Гц, частота ШИМ – 16 кГц

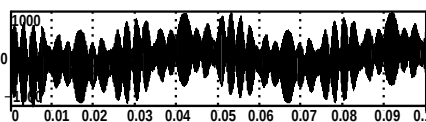


Рис. 8. Напряжение на статоре АД при длине кабеля 500 м, частота на выходе преобразователя 20 Гц, частота ШИМ – 8 кГц

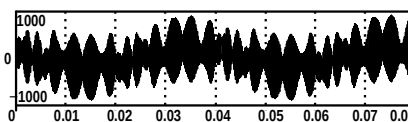
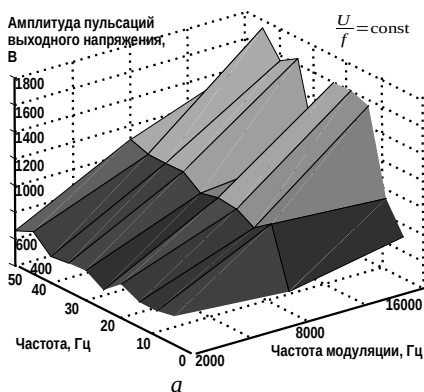
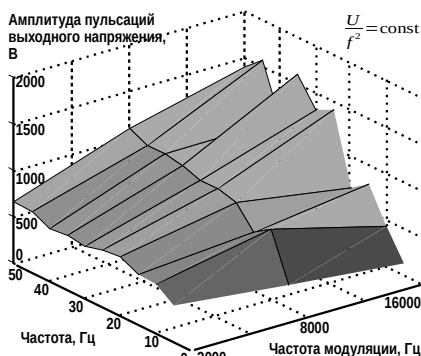


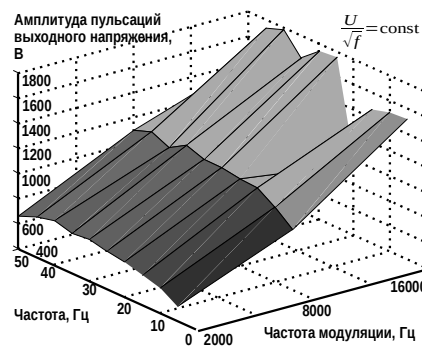
Рис. 9. Напряжение на статоре АД при длине кабеля 250 м, частота на выходе преобразователя 25 Гц, частота ШИМ – 16 кГц



а



б



в

Рис. 10. Зависимости напряжения на статоре АД при изменении частоты преобразователя, частоты модуляции выходного напряжения, закона регулирования: пропорционального (а); квадратичного (б); корневой (в)

Список литературы

1. Преобразователи частоты для асинхронных двигателей 0.75 кВт - 160кВт / 1HP - 250HP 200 - 480 В 1 или 3 фазы. URL: <http://www.invertekdrives.com/client-uploads/download-manager/user-guides/82-P2MAN-RUV1.01.pdf>. (дата обращения 23.04.16).
2. Преобразователи частоты Altivar 12: Каталог. URL: <http://www.icsgroup.ru/upload/iblock/87b/2749.pdf>. (дата обращения 23.04.2016).
3. Преобразователи частоты и моторный кабель. URL: <https://tsdservice.com.ua/preobrazovately-chastoty-i-motornyj-kabel.html>. (дата обращения 23.04.2016).
4. Преобразователь частоты FR-D700. Руководство по установке. URL: http://www.esspb.ru/Documents/FR-D700_installatin.pdf. (дата обращения 23.04.2016).
5. Шилин А.Н., Крутякова О.А. Цифровое моделирование электротехнических и электронных устройств. Москва: Академия Естествознания, 2013. 131 с.

References (transliterated)

1. Preobrazovateli chastoty dlja asinhronnyh dvigatelej 0.75kVt – 160 kVt/ 1HP – 250HP 200 – 480 V 1 ili 3 fazy [Frequency converters for asynchronous motors 0.75 kW - 160 kW / 1HP - 250HP 200 - 480 V 1 or 3 phases]. URL: <http://www.invertekdrives.com/client-uploads/download-manager/user-guides/82-P2MAN-RUV1.01.pdf>. (accessed 23.04.2016).
2. Preobrazovateli chastoty Altivar 12. Katalog [Altivar frequency converters 12. Catalog]. URL: <http://www.icsgroup.ru/upload/iblock/87b/2749.pdf>. (accessed 23.04.2016).
3. Preobrazovateli chastoty i motornyj kabel [Frequency converters and motor cable]. URL: <https://tsdservice.com.ua/preobrazovately-chastoty-i-motornyj-kabel.html>. (accessed 23.04.2016).
4. Preobrazovatel chastoty FR-D700. Rukovodstvo po ustanovke [Frequency converter FR-D700. Installation Guide]. URL: http://www.esspb.ru/Documents/FR-D700_installatin.pdf. (accessed 23.04.2016).
5. Shilin, A.N., Krutyakova, O.A. Tsifrovoye modelirovaniye elektrotekhnicheskikh i elektronnykh ustroystv [Digital simulation of electrical and electronic devices]. Moscow: Akademiya Yestestvoznaniya, 2013. 131 p.

Поступила 22.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чорний Олексій Петрович (Черный Алексей Петрович, Oleksii Chornyi) – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, директор Інституту електро-механіки, енергозбереження і систем управління; м. Кременчук, Україна; e-mail: alekseii.chornyi@gmail.com

Титюк Валерій Костянтинович (Тытюк Валерий Константинович, Valerii Tytiuk) – кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Криворізький національний університет», доцент кафедри електромеханіки; м. Кривий Ріг, Україна; e-mail: dinalt2006@gmail.com

Зачепа Юрій Володимирович (Зачепа Юрий Владимирович, Iurii Zachepa) – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри систем автоматичного управління та електроприводу; м. Кременчук, Україна; e-mail: iuriizachepa@gmail.com

Сергієнко Сергій Анатолійович (Сергиенко Сергей Анатольевич, Serhiienko Serhii) – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, проректор із науково-педагогічної роботи та новітніх технологій в освіті; м. Кременчук, Україна; e-mail: serhiy.serhiyenko@gmail.com

Бурдильна Євгенія Володимирівна (Бурдильная Евгения Владимировна, Evgeniia Burdilnaya) – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, старший викладач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій; м. Кременчук, Україна; e-mail: evburdilnaya@gmail.com